基于 PFDHA 的 X80 管道应变失效可靠度计算方法

刘啸奔[1,2],房茂立[3],郑倩[1],王亮[3],杨悦[1],顾晓婷[4]

(1. 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室/石油工程教育部重点实验室/城市油气输配技术北京市重点实验室,102249 北京;2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区,834000 克拉玛依;3. 中国石化石油工程设计有限公司,257000 东营;4. 长江大学石油工程学院,430100 武汉)

摘　要: 地质断层是长输油气管道的主要地质灾害威胁,断层灾害条件下管道会由于过大的应变而失效。现有基于应变设计的确定性分析方法相对保守,无法考虑管道结构、管周土壤和地震断层位移的多重不确定性。为此,提出了一种综合考虑管道几何尺寸、管土相互作用,以及断层位移不确定性的可靠性分析方法。采用管道设计应变数据库,建立管道设计应变与各影响参数间的神经网络预测模型,获得基于应变的断层错位下管道极限状态方程。通过 Monte-Carlo 模拟,计算得到特定断层位移下考虑管道尺寸参数、管土作用参数、内压等参数不确定性的管道失效概率。基于断层位移概率危险性分析流程(PFDHA),对断层位移的不确定性进行考量,得到各断层位移在不同服役期下的发生概率。结合既得的管道条件失效概率,基于全概率计算公式可得管道在该服役期内的失效概率。以管道穿越博罗科努-阿其克库都克断裂的新粤浙 X80 管道为例开展分析,获取了该管道在服役 10 年、20 年、30 年的失效概率。结果表明:新粤浙 X80 管道服役 20 年内满足 CSA Z662 规定的目标可靠性要求;服役年限大于 20 年后,该穿越段管道失效概率将超越最大允许的失效概率,需采取必要的抗震措施。

关键词: 断层;管道;可靠性计算;断层位移概率危险性分析;服役年限

中图分类号: TE973.1　　　　**文献标志码:** A

Reliability calculation method for X80 pipeline's strain failure based on PFDHA

LIU Xiaoben[1,2], FANG Maoli[3], ZHENG Qian[1], WANG Liang[3], YANG Yue[1], GU Xiaoting[4]

(1. National Engineering Laboratory for Pipeline Safety/MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering/Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, 102249 Beijing, China; 2. China University of Petroleum-Beijing Karamay Campus, 834000 Karamay, China; 3. Sinopec Petroleum Engineering Corporation, 257000 Dongying, China; 4. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, 430100 Wuhan, China)

Abstract: Tectonic fault is one of the main geohazards that occur to long-distance oil and gas pipelines. Large longitudinal strain induced by active fault will lead to pipeline rupture failure. The existing deter-

收稿日期: 2020-07-14　　　**修回日期:** 2021-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 52004314);新疆自治区天山青年计划项目(No. 2019Q088);中国石油大学(北京)青年拔尖人才基金(No. 2462018YJRC019);中国石油科技创新基金项目(No. 2017D-5007-0606);中国石油大学(北京)科研基金项目(No. 2462020YXZZ045)

通信作者: 刘啸奔,副教授,研究方向为油气储运设施本质安全与完整性评价。E-mail: xiaobenliu@cup.edu.cn

引用格式: 刘啸奔,房茂立,郑倩,等. 基于 PFDHA 的 X80 管道应变失效可靠度计算方法[J]. 应用力学学报,2022,39(1):148-154.

LIU Xiaoben, FANG Maoli, ZHENG Qian, et al. Reliability calculation method for X80 pipeline's strain failure based on PFDHA[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1):148-154.

ministic analysis methods based on strain design are relatively conservative and cannot take into account the multiple uncertainties of pipeline structure, circumferential soil or seismic fault displacement. Therefore, this paper proposes a reliability analysis method which takes into account the pipeline geometry, tube-soil interaction, and the uncertainty of fault displacement. Using the pipeline design strain database, the neural network prediction model between the pipeline design strain and the influencing parameters was established, and then the limit state equation based on the strain was obtained. Through Monte-Carlo simulation, the conditional failure probability of pipelines with uncertain parameters such as pipe size parameter, pipe soil action parameter and internal pressure under specific fault displacement was calculated. Based on the probabilistic risk analysis process of fault displacement (PFDHA), the uncertainty of fault displacement was considered, and the occurrence probability of each fault displacement during different service periods was obtained. Combined with the obtained failure probability of pipeline conditions, the total failure probability of pipeline in this service period can be obtained based on the calculation formula of total probability. This paper takes the intersection site between XinYueZhe X80 pipeline and Bo – AF located in Xinjiang an example to carry out the analysis, and the failure probability of the pipeline section in ten, twenty, thirty years of service is obtained. The results show that the pipeline will meet the target reliability requirements laid down by CSA Z662 over next twenty years. However, if the service life is more than twenty years, the failure probability of the pipeline will exceed the maximum allowable failure probability, and the pipeline section at the crossing shall be equipped with seismic fortification.

Key words: fault; pipeline; reliability calculation; probabilistic risk analysis of fault displacement; service life

活动断层是影响长输油气管道运行本质安全的重大威胁,在地面永久变形作用下,断层面附近管道上产生较大的应变,引发管道结构安全性能降低。因此,针对断层区管道的结构安全分析是管道初始设计与完整性管理中的重要内容。目前穿越断层管道主要采用基于应变的设计与评价方法,这种方法虽然能够有效利用管道的塑性变形,但由于在确定性的极限状态分析方法中无法考虑管道结构、管周土壤和地震断层位移的多重随机非线性,只能通过获取相对保守的参数开展保守性分析计算。

采用基于可靠性的设计方法,能够更为准确地考虑实际工程参数不确定性对管道失效带来的影响。最近数十年内来,管道的可靠性设计得到工业界的较大关注。对于断层区管道,根据可靠性计算,参考变量可分为影响管道结构的不确定变量与断层地质位移的不确定变量。

在考虑影响管道结构的不确定变量的可靠性分析方面,文献[1]以埋地燃气管道为研究对象,基于管道工作环境与地震作用下的受力特征,确定了在特定地震强度水平下地震需求超过规定值的概率。文献[2]利用解析法计算了滑坡灾害条件下埋地管道应变响应,并借助 Monte Carlo 方法计算了管道在滑坡作用下的失效概率。文献[3]构建了地震波作用下埋地管道有限元模型,计算推导了以应力为指标的管道受力方程,基于概率密度演化法计算了管道的可靠性。

在考虑断层位移不确定性的管道可靠性计算方面,现有研究主要选用断层灾害条件下地震永久位移的概率性分布或地震波动条件下地震烈度的概率分布对地震场地下埋地管道的可靠性或危险性开展分析。文献[4]通过把地震危险性研究中的概率分析应用于管道抗震设计研究中,借助 Monte Carlo 随机模拟方法对地面永久位移开展了危险性评估,确定了地面位移的年超越概率,以确定性的结构有限元模型得到埋地管道在不同地面位移下的失效概率。

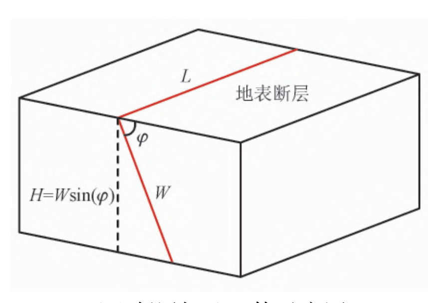
综上所述,目前大多数学者在分析断层灾害条件下管道的可靠性时,仅考虑了影响管道结构的不确定性变量(管径、壁厚、运行内压、土壤条件),忽略了地震本身(断层位移)的不确定性因素。而断层位移是导致管道失效的主动因素,因此在进行断层区管道可靠性评价时,有必要考虑断层位移这一因素的不确定性,进而得到更具工程价值的可靠性结果。

1 断层位移概率危险性分析

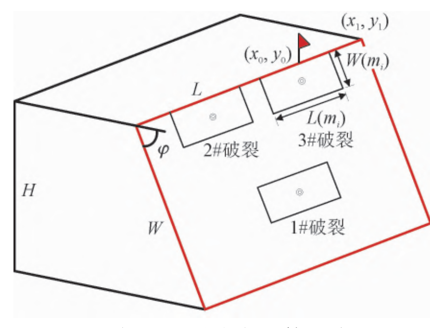
断层位移概率危险性分析(probabilistic fault

displacement hazard analysis, PFDHA)是确定所在场地断层位移超过某一确定断层位移的年超越概率方法。由断层相对移动活动规律可知,随着该指定断层位移的逐渐升高,产生断层位移超越该水平的概率逐渐降低。地震学中常将断层假设为如图 1 所示的长方体,其中红色线框包围的为断层面,该断层面长 L、宽 W, H 为断层深度, φ 为断层倾角[5]。

假设所研究的场点坐标为(x_0, y_0)(图中小旗位置),则根据破裂深度和影响后果将断层面归为三类:破裂位置较深,破裂未扩展至地表(图中 1#破裂);破裂位置较浅,破裂扩展至地表但未对研究场点造成影响(图中 2#破裂);破裂位置较浅,且断层破裂导致场点处产生地表变形(图中 3#破裂)。对于本文研究的穿越断层管道的结构安全分析,只需要考虑 3#破裂这种可能引发管道埋设场地土产生永久地面变形的断层破裂。



(a)断层场地立体示意图



(b)断层破裂分布立体示意图

图 1　断层场地几何模型

Fig. 1　Geometry model of fault site

将震中距 r 以坐标形式表示,断裂面中心坐标为(x, y),得到某一断层位移的超越概率公式,即

$$p(\delta > \delta') = \nu(m_{\min}) \sum_{i=1}^{N} P(m_i) \iint_{\substack{x \in L \\ y \in W}} f(x,y \mid m_i) \cdot P(\text{rupture} \mid m_i, x, y) \cdot P[\delta(x_0,y_0) > \delta' \mid \text{rupture}, m_i, x, y]\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{1}$$

式中: $\nu(m_{\min})$ 为满足大于起算震级的地震年均发生率; $P(m_i)$ 为发生 m_i 级地震的概率; $f(x,y|m)$ 为震级 m 下震中距为 r 的条件概率密度; $P(\text{rupture}|m,x,y)$ 为给定震级 m 和震中距 r 条件下,地震导致地表形变的概率; $P(\delta>\delta'|\text{rupture},x,y)$ 为给定震级 m 和震中距 r 且地震导致地表形变条件下,地表永久位移 δ 大于给定位移 δ' 的概率。

震源中心的条件概率密度函数以及发震断层产生破裂的条件概率可分别表示为

$$f(x,y|m_i) = \lambda_i \equiv \frac{L(m_i) \cdot W(m_i)}{L \cdot (W - H/\sin\delta)} \tag{2}$$

$$P(\text{rupture}|m_i,x,y) = \begin{cases} 1, x_1 - x_0 \geqslant L(m_i), \\ \quad x_0 - L(m_i) < x < x_0 + L(m_i), \\ \quad y = y_0 - 1/2W(m_i) \\ 1, x_1 - x_0 < L(m_i), \\ \quad x_0 - L(m_i) < x < x_1, \\ \quad y = y_0 - 1/2W(m_i) \\ 0, \text{others} \end{cases} \tag{3}$$

式中 $L(m_i)$、$W(m_i)$ 分别为断层面的长度和宽度。

将破裂面中心线离散为 N 个点,经整理后得

$$p(\delta > \delta') = \nu(m_{\min}) \sum_{i=1}^{N} P(m_i)\lambda_i\xi_i \frac{L_R(m_i)}{L(m_i)} \cdot P[\delta(x_0) > \delta'_{\max} \mid \text{rupture}, m_i] \tag{4}$$

式中: $L_R(m_i)$ 为震级为 m_i 时产生的地表破裂的长度; ξ_i 为表征地表破裂的参数,与地表位错分布形式有关,可参考文献[6]获取。

2　断层位移下管道结构可靠性分析

管道结构可靠性分析目标是获取管道的失效概率,其核心内容包括建立表征管道失效的极限状态方程和管道可靠性的分析计算。断层作用下管道容易在管道轴向产生较大的永久变形,一般采用基于应变的失效判断准则[7]。因此可以通过断层作用下管道的应变需求和管道的应变能力构建管道的极限状态方程。

通过前期研究,考虑了管道尺寸参数、管土相互作用参数(侧向、轴向、垂向土弹簧)、断层倾角、断层位移、断层穿越角,建立了断层作用下 X80 管道设计应变数据库[8-9]。在此基础上,通过双层反馈性神

经网络模型，发明了断层区 X80 管道的应变预测模型(如图 2 所示)，实现了走滑断层作用下管道应变的精确预测。通过与有限元结果对比，表明建立的神经网络模型的回归系数达到 99.992%，误差结果小于 5%。该模型为基于应变的断层作用下管道极限状态方程的建立提供了应变需求的计算方法。

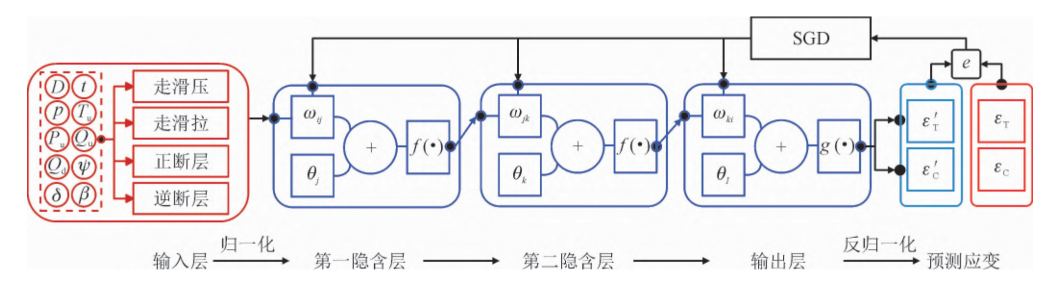


图 2　基于多层反馈神经网络的管道应变需求预测模型

Fig. 2　Pipeline strain demand prediction model based on multi-layer feedback neural network

管道基于应变极限状态方程中极限拉伸应变 TSC、极限压缩应变 CSC 的计算方法可参考 ALA 2005[10]、CSA Z662[11]、GB/T 50470[12] 等国内外标准规范。本文以 ALA 2005 为例开展管道结构可靠性计算，即

$$\begin{cases} \mathrm{TSC} = 2\% \\ \mathrm{CSC} = 0.5\left(\dfrac{t}{D}\right) - 0.0025 + 3000\left(\dfrac{pD}{2Et}\right)^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中：t 为管道壁厚；D 为管道外径；p 为管道内压；E 为管道弹性模量。

可以得到管道拉伸破裂与局部屈曲两种极限状态的平衡方程，即

$$\begin{cases} g_1(x) = \mathrm{TSC} - \varepsilon_{\mathrm{dt}} \\ g_2(x) = \mathrm{CSC} - \varepsilon_{\mathrm{dc}} \end{cases} \quad (6)$$

式中：TSC 和 CSC 分别为管道的极限拉、压应变，$\varepsilon_{\mathrm{dt}}$ 和 $\varepsilon_{\mathrm{dc}}$ 分别为基于神经网络得到的拉伸、压缩应变需求。

根据结构可靠性可以得到，当极限状态函数 $Z = g(X) < 0$ 时，管道会因为应变过大而失效，因此失效概率可由极限状态函数 Z 的概率密度函数积分得到，即

$$p_f = P_f(Z \leqslant 0) = \int_{-\infty}^{0} f_Z(z)\,\mathrm{d}z = \int \cdots \int_{Z \leqslant 0} f_X(x_1, x_2, \cdots, x_n)\,\mathrm{d}x_1 \mathrm{d}x_2 \cdots \mathrm{d}x_n \quad (7)$$

式中 $f_X(x) = f_X(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为基本随机变量 $\boldsymbol{X} = (D, t, \cdots, Q_{\mathrm{d}})^{\mathrm{T}}$ 的联合概率密度函数。

由于多重反馈神经网络的高度非线性，管道应变需求与各影响因素难以得到显著的数学关系，一次二阶矩、二次二阶矩等近似解析计算方法无法适用。因此，可采用如图 3 所示的 Monte Carlo 模拟方法进行管道失效概率求解。

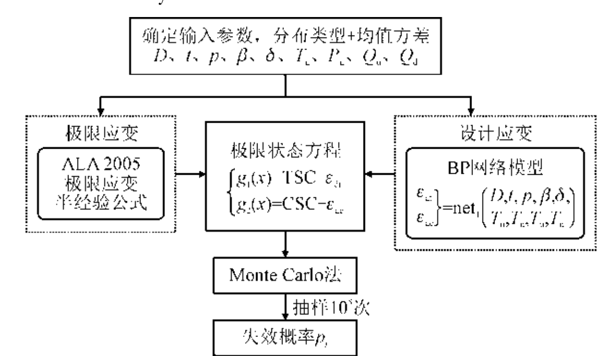


图 3　基于 Monte Carlo 的特定断层位移条件下管道可靠性计算方法

Fig. 3　Pipeline reliability calculation method based on Monte Carlo under specific fault displacement conditions

3　基于地震危险性的断层位移下管道可靠性分析

在断层位移作用下管道结构失效概率分析的基础上，结合 PFDHA 分析得到管道断层位移的发生概率，可以通过条件概率得到综合考虑管道结构系统不确定性和地震不确定性的管道可靠性计算方法。其中，断层位移发生概率可以进一步考虑时间的影响，即

$$P_t(\delta > \delta_{\mathrm{crit}}) = 1 - [1 - P_1(\delta > \delta_{\mathrm{crit}})]^t \quad (8)$$

式中：$P_1(\delta > \delta_{\mathrm{crit}})$ 为年超越概率，$P_t(\delta > \delta_{\mathrm{crit}})$ 为 t 年超越概率；t 为时间(单位为年)。

随着断层位错动量增大，管道的应变也不断升高，通过不同断层位移错动量下管道全失效概率的积分计算管道真实失效概率。

$$P_f = \int_0^{\delta} P_s(\mathrm{failure} \mid x) \cdot P_t(\delta > x)\,\mathrm{d}x \quad (9)$$

式中 $P_s(\mathrm{failure} \mid x)$ 为特定断层位移下管道结构失效条件概率，可由管道 Monte Carlo 方法求得。$P_t(\delta > x)$ 为管道穿越断层区地表永久位移的超越概率。

4　新粤浙管道穿越博-阿断层的案例分析

4.1　博罗科努-阿齐克库都克断裂与新粤浙管道交汇情况

新疆煤制气天然气外输管道(以下简称新粤浙管道)与新疆地区博罗科努-阿齐克库都克断裂(以下简称为博-阿断裂)在精河县东南处(图4(a))交汇,交汇位置属于博-阿断裂带的潜在震源区。博-阿全新世活动断裂带规模庞大且地壳厚度陡变,对管线的安全运行造成严重威胁[5]。按照新粤浙管道设计方案,管道断层以65°夹角穿越。这种情况下,断层位移作用下管道会产生如图4(b)的空间位移错动。

4.2　参数取值与分布

根据地震危险性概率分析的要求,各地震带起算震级取为 $m_{min}=4.0$ 级[13]。统计1 900年来地理范围在43°~46°N、81°~85°E、震级大于等于4级的地震。取震级间隔为1,震级上限设为8。采用Gutenberg-Richter公式描述震级-频度关系,回归得震级频度曲线为 $y=-0.504\,5x+3.960\,4$,方差为0.990 6,结果如图5所示。

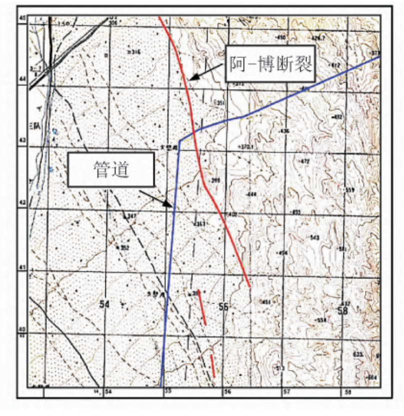
博-阿断裂北西段的潜在震源区主干断裂为全新世活动断裂,根据文献评估结果,该地区潜在震级上限可设定为7.5级[14],震级空间分布函数如表1所示。

表1　震级空间分布函数

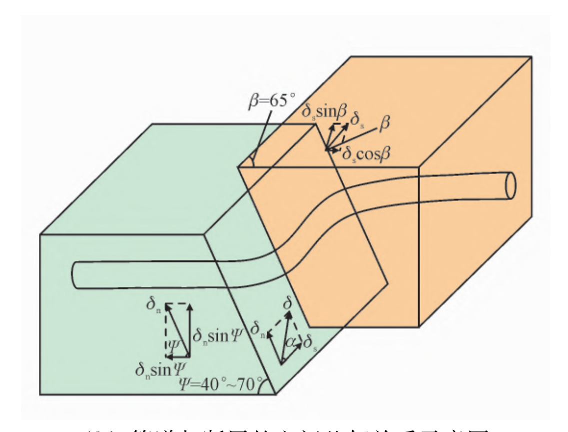
Tab. 1 Spatial distribution function of magnitude

震级	4.0~4.4	4.5~4.9	5.0~5.4	5.5~5.9	6.0~6.4	6.5~6.9	7.0~7.4	≥7.5
概率	0.083 33	0.050 00	0.035 71	0.014 29	0.007 14	0.009 52	0.002 38	0.000 00

穿越博-阿断裂段的新粤浙管道直径1 219 mm、壁厚18.4 mm,设计压力12 MPa。假设断裂区内回填土采用中砂,断层倾角在40°~70°之间呈均匀分布。结合地质勘察结果,其参数及其分布取值如表2所示。



(a)新粤浙管道与博-阿断层图



(b)管道与断层的空间几何关系示意图

图4　新粤浙管道博-阿断层交汇图

Fig. 4　Geometry schematic of intersection between XinYueZhe pipeline and Bo-AF fault

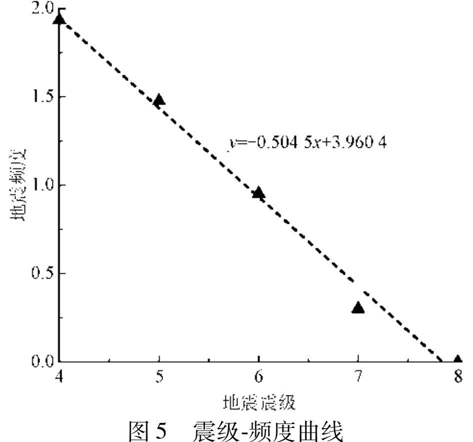


图5　震级-频度曲线

Fig. 5　Magnitude-frequency curve

表2　穿越博-阿断裂段新粤浙管道的相关参数[15]

Tab. 2 Related parameters of Bo-AF fault section of the XinYueZhe pipeline[15]

参数	分布	均值 μ	标准差 σ
管径 D/mm	正态	1 219	1.33
壁厚 t/mm	正态	18.86	0.46
内压 p/MPa	正态	12	1.2
穿越角 β/(°)	确定	65	–
倾角 Ψ/(°)	均匀	40~70	–
轴向土弹簧 T_u/(kN·m^{-1})	正态	33	0.3
侧向土弹簧 P_u/(kN·m^{-1})	正态	375	10
向上土弹簧 Q_u/(kN·m^{-1})	正态	46	0.15
向下土弹簧 Q_d/(kN·m^{-1})	正态	1 912	20

基于地震相关参数，根据本文第 1 节介绍方法计算获得博-阿断层位移地面永久位移超越概率，如图 6 所示。由图 6 可以看出，地表永久位移的超越概率随断层位移的增加呈指数型下降趋势，符合 PFDHA 分析中设定的危险性评价模式。

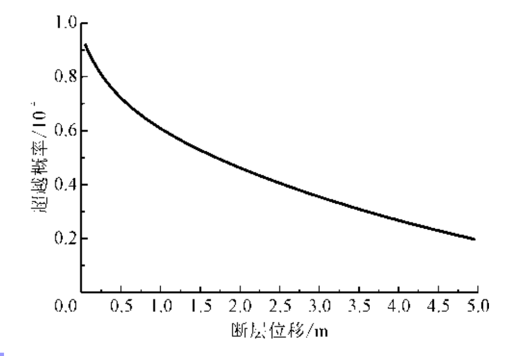


图 6　博-阿断层作用下地表永久位移的年超越概率

Fig. 6　Annual exceeding probability of PGD caused by Bo-AF fault displacements

考虑新粤浙管道长期服役，博-阿断层区新粤浙管道在服役期间的可靠性，根据式(8)将以上年超越概率转化为未来 10 年、20 年、30 年条件下的断层位移超越概率，对新粤浙管道在长期服役期间的可靠性开展计算分析，获得的地表位移超越概率结果，如图 7 所示。

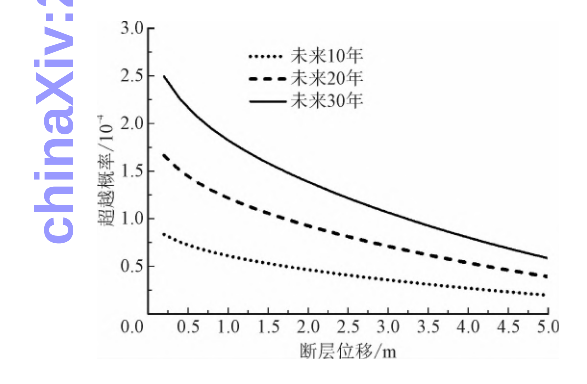


图 7　断层位移超越概率

Fig. 7　Exceedance probability of fault displacements

采用 Monte Carlo 方法对本文建立的极限状态方程进行模拟求解，计算逆断层位移分量(垂直面内)与走滑断层位移分量(水平面内)条件下新粤浙管道的失效概率，得到不同断层位错条件下管道的失效概率，如图 8 所示。结果表明，在相同的断层位移下，断层垂直位移分量对应的管道失效概率远高于水平位移分量对应的失效概率。因此，管道的整体失效情况取决于断层的垂直位移量，后文计算中只需考虑管道在断层垂直位移下的失效概率。

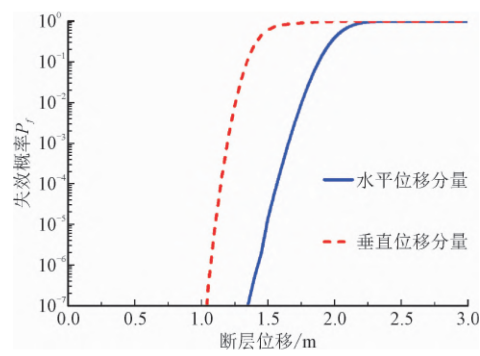


图 8　不同方向位移分量条件下新粤浙管道的失效概率

Fig. 8　Failure probability of XinYueZhe pipeline withl fault displacement components under different directions

基于 CSA Z662 附录 O 中承载能力极限状态的目标可靠性计算公式，确定管道一级地区参考目标可靠性 R_T 为

$$R_T = 1 - \frac{49\ 700}{\rho PD^3} = 1 - \frac{49\ 700}{0.04 \times 12 \times 1\ 219^3} = 0.999\ 94 \tag{10}$$

式中：ρ 为地区平均人口密度，本文按照 CSA Z662 标准取值，一级地区取 $\rho = 0.04$ 人/公顷；P 为管道内压(单位为 MPa)；D 为管道外径(单位为 mm)。

因此，确定最大允许失效概率为 $P_{f\max} = 1 - R_T = 5.716 \times 10^{-5}$。结合结构可靠性结果与 PFDHA 分析结果，获得不同断层位移条件下管道在未来 10 年、20 年、30 年的失效概率曲线，如图 9 所示。

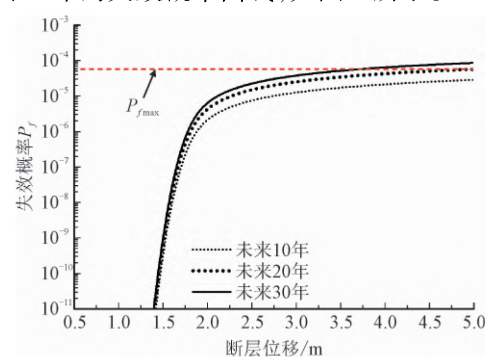


图 9　不同断层位移条件下新粤浙管道的失效概率

Fig. 9　Failure probability of XinYueZhe pipeline under different fault displacements

由图 9 可知，新粤浙管道的失效概率随着断层位移的增大而增大。同时，由于地震发生概率与时间呈正相关，因此新粤浙管道的失效概率会逐年增大。分析结果表明：管道在未来 20 年内可以保证满足 CSA Z662 规定的目标可靠性的要求；在服役 20 年后，新粤浙管道最大失效概率为 5.699×10^{-5}，接近最大允许失效概率 5.716×10^{-5}；在服役 30 年内管道将不满足可靠性要求，需对该穿越处管段采取

必要抗震措施。

5 结 论

本文基于 PFDHA 分析提出了一种同时考虑地震断层位移不确定性、管土结构响应与材料参数不确定性的断层区 X80 管道可靠性计算方法。方法在断层位移不确定的基础上,推导了考虑时间尺度影响的断层位移超越概率计算公式。在此基础上建立了基于多层反馈神经网络与 Monte Carlo 方法分析断层作用下管道结构基于应变失效准则的失效概率求解模型。以管道结构的失效概率与地表永久位移超越概率分析为基础,对穿越新疆地区博-阿断裂区的新粤浙管道开展可靠性分析评价,结果表明,管道在服役 20 年内可以满足 CSA Z662 规定的目标可靠性的要求;若服役年限超过 20 年,管道的失效概率将超过最大允许失效概率,需采取必要的抗震措施。PFDHA 分析可为穿越断层管道的安全评价与可靠性分析提供断层位移的输入,使管道结构可靠性分析更加完备,为穿越断层管道线路设计提供指导与参考。

参考文献

[1] 张鹏,李伟. 城市埋地燃气管道概率地震需求分析[C]//纪念汶川地震一周年地震工程与减轻地震灾害研讨会. 成都:中国地震工程联合会,2009.

[2] ZHOU W. Reliability of pressurised pipelines subjected to longitudinal ground movement[J]. Structure and infrastructure engineering,2012,8(12):1123-1135.

[3] LIN Y J, LIU W, LI J. Seismic reliability analysis of buried gas pipes[C]//Proceedings of the 5th international symposium on innovation & sustainability of structures in civil engineering. Nanjing:Southeast University Press,2013.

[4] CHENG Y, AKKAR S. Probabilistic permanent fault displacement hazard via Monte Carlo simulation and its consideration for the probabilistic risk assessment of buried continuous steel pipelines[J]. Earthquake engineering & structural dynamics,2017,46(4):605-620.

[5] 郑倩. 断层作用下埋地油气管道的可靠性分析与评价[D]. 北京:中国石油大学(北京),2019.

[6] WELLS D L, COPPERSMITH K J. Updated empirical relationships between magnitude, rupture length, rupture area and surface displacement[J]. Bulletin of the seismological society of America,1994,84(4):972-1002.

[7] 刘冰,刘学杰,张宏. 基于应变的管道设计准则[J]. 天然气工业,2008,28(2):129-131. (LIU Bing, LIU Xuejie, ZHANG Hong. Pipeline design code based on morphotropy strain[J]. Natural gas industry,2008,28(2):129-131(in Chinese)).

[8] LIU X B, ZHANG H, WU K, et al. Buckling failure mode analysis of buried X80 steel gas pipeline under reverse fault displacement[J]. Engineering failure analysis,2017,77:50-64.

[9] LIU X B, ZHANG H, LI M, et al. Effects of steel properties on the local buckling response of high strength pipelines subjected to reverse faulting[J]. Journal of natural gas science and engineering,2016,33:378-387.

[10] American Lifelines Alliance-ASCE. Guidelines for the design of buried steel pipe[S]. USA:ASCE,2005.

[11] Canadian Standards Association. Oil and gas pipeline systems:CSA Z6622007[S]. Canada:CSA,2007.

[12] 中国石油管道局工程有限公司. 油气输送管道线路工程抗震技术规范:GB/T 50470—2017[S]. 北京:中国计划出版社,2017.

[13] 袁一凡,田启文. 工程地震学[M]. 北京:地震出版社,2012.

[14] 耿昭. 博罗科努断裂东南段地震危险性评价[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2016.

[15] ZHOU W. Reliability of pressurised pipelines subjected to longitudinal ground movement[J]. Structure and infrastructure engineering,2012,8(12):1123-1135.

(编辑 张璐)